

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОМПРЕДПРИЯТИЯ

В. С. Мокроусов

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых*

Поступила в редакцию 03.07.2012

Аннотация. В статье рассматриваются результаты многокритериальной оценки мероприятий по энергосбережению промышленного предприятия методом анализа иерархии и методом анализа среды функционирования. На основании полученных результатов предлагается методика по повышению качества получаемых результатов и снижению трудозатрат для исполнителя.

Ключевые слова: многокритериальная оценка мероприятий по энергосбережению, метод анализа иерархий, метод анализа среды функционирования.

Annotation. The article deals with the results of the multicriteria evaluation of energy conservation measures of the industrial enterprise by the method of analytic hierarchy process and the method of data envelopment analysis. Based on these results suggesting the technique to improve the quality of the results and to reduce working hours for the performer.

Keywords: multicriteria evaluation of energy conservation measures, the analytic hierarchy process, the data envelopment analysis.

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности капиталовложений в систему теплоснабжения промпредприятия предполагает реализацию комплекса мероприятий по энергосбережению, сформированного на основе применения методов многокритериальной оценки экономических, технических и качественных показателей деятельности данной организации.

Актуальность многокритериального анализа направлений по энергосбережению и энергоэффективности систем теплоснабжения связана с тем, что при экономической оценке многие предлагаемые мероприятия представляются не выгодными для заказчика из-за низкой экономии тепловой энергии и большого срока окупаемости. При учете дополнительных характеристик, таких как надежность, снижение числа обслуживания в течение года, повышение качества отпускаемой тепловой энергии и др. (например, для мероприятия по замене системы химводоподготовки на котельной) позволяет показать заказчику их актуальность для данного промпредприятия.

Задачей исследования является выбор эффективных мероприятий по энергосбережению

в системе теплоснабжения в перечне, составленном по результатам прединвестиционного энергоаудита промышленного предприятия.

В качестве объекта научного исследования рассматривается система теплоснабжения ОАО «Владимирский химический завод» (далее по тексту ОАО «ВХЗ»).

В результате проведенного энергетического обследования ОАО «ВХЗ» был составлен перечень мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности системы теплоснабжения, представленный в таблице 1.

Формирование перечня критериев для оценки мероприятий по энергосбережению производилось на основе опроса 28 предприятий Владимирской области, осуществляющих производство и транспортировку тепловой энергии. Перечень содержит следующие частные критерии: экономия тепловой энергии (К1); капитальные затраты (К2); эксплуатационные расходы (К3); удобство в эксплуатации (К4); численность обслуживающего персонала (К5); повышение надежности (К6); повышение качества энергетических ресурсов (К7); срок службы оборудования (К8).

Представленные критерии оцениваются на основании экспертизы как в количественном

*Перечень рассматриваемых мероприятий по энергосбережению
и повышению энергетической эффективности*

№ п/п	Наименование мероприятия	Краткое обозначение
1	Внесение нормативных значений технологических потерь тепловой энергии при ее передаче по сетям сторонних потребителей в договора на теплоснабжение.	М1
2	Составление температурного графика теплофикационной воды на предприятии	М2
3	Установка видеографических регистраторов в тепловых узлах производственных цехов и административно-бытовых зданий	М3
4	Гидропромывка систем отопления административно-бытовых зданий и производственных цехов	М4
5	Замена слоя теплоизоляции и гидроизоляции трубопроводов	М5
6	Замена слоя теплоизоляции и гидроизоляции паропроводов	М6
7	Установка частотно-регулируемых приводов на сетевые насосы в ВПУ-1 и ВПУ-3	М7
8	Установка конденсатоотводчика на технологическую линию ЛГП-1250	М8
9	Установка конденсатоотводчика на резервуары склада пластификаторов цеха №4	М9
10	Установка редукционного клапана для понижения давления пара, поступающего на нагрев резервуаров склада пластификаторов	М10
11	Установка системы химводоподготовки в ВПУ-1 и ВПУ-3	М11
12	Теплоизоляция фасада производственного цеха №4	М12
13	Теплоизоляция фасада производственного цеха №31	М13
14	Уменьшение диаметров паропроводов тепловых сетей предприятия	М14
15	Установка стеклопакетов в ПВХ профилях в цехе №4 и цехе №12	М15
16	Замена изношенных и наиболее используемых ворот производственных цехов на автоматические рулонные ворота	М16
17	Замена пароводяных кожухотрубчатых теплообменников в ВПУ-1 и ВПУ-3 на пластинчатые теплообменники	М17
18	Изменить систему обогрева резервуаров склада пластификаторов с горизонтальной на вертикальную, теплоизоляция горизонтальных резервуаров	М18

выражении (например, снижение потребления энергетических ресурсов, капитальные затраты), так и по бальной системе (долговечность, удобство эксплуатации и т.п.).

Перед оценкой мероприятий по энергосбережению с помощью предлагаемых критериев рекомендуется произвести дополнительное согласование приоритетов критериев с главным энергетиком или инженером предприятия, с целью уточнения специфики рассматриваемого предприятия.

В качестве методов многокритериального анализа предлагается использовать метод анализа иерархий (далее по тексту – МАИ) и метод Data Envelopment Analysis (далее по тексту – DEA). Выбранные методы применяются в задачах многокритериального принятия решений

с возможностью оценки как количественных, так и качественных критериев [1,2]. Таким образом, данные методы могут быть использованы для выбора эффективных мероприятий по энергосбережению и энергоэффективности с учетом рассматриваемых критериев.

Численные значения технологических и потребительских частных критериев, для мероприятий по энергосбережению, принимались согласно паспортным данным и результатам проведенного камерального и инструментального обследования объекта, а финансовые из экономического расчета.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Проблема выбора эффективных мероприятий по энергосбережению и энергоэффектив-

ности на основании многокритериального анализа методом анализа иерархий представляется следующим образом – рис. 1.

Для ранжирования мероприятий по эффективности использовалась линейная свертка, весовые коэффициенты (далее – вектор приоритетов) которой определялись методом МАИ. Алгоритм проведения расчетов включает три этапа:

1) Определение степени влияния элементов второго уровня иерархии (критериев) на цель (1 уровень) по выбору эффективных мероприятий в виде нормированного вектора приоритетов критериев W_1 ;

2) Определение относительной важности мероприятий по энергосбережению (далее – альтернатив) с точки зрения рассматриваемых критериев в виде векторов приоритетов альтернатив $W_i, i = 2, \dots, 19$.

Вектор приоритетов альтернатив W рассчитывается как правый собственный вектор матрицы парных сравнений $[A]$ из равенства [3]:

$$[A] \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W, \quad (1)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение положительной квадратной матрицы $[A]$.

Сравнение проводится на основе реальных измерений или с помощью фундаментальной шкалы абсолютных значений, предложенной Т. Л. Саати [1], которая отражает относительную силу предпочтений и ощущений.

Если элементы матрицы $[A]$ основаны на субъективных суждениях, то для оценки отклонения используется индекс согласованности [1]:

$$CR = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (2)$$

где n – порядок квадратной матрицы.

В общем случае, если $CR \leq 0,1$, то суждения удовлетворительные.

3) Определение результирующего вектора приоритетов альтернатив согласно следующей формуле [3]:

$$W = [A] \cdot [L] \cdot [W_1] \cdot [B], \quad (3)$$

где $[A]$ – матрица, столбцами которой служат компоненты векторов приоритетов альтернатив относительно критериев; $[L]$ – структурная матрица, элементами диагонали которой являются соотношения числа альтернатив над каждым критерием к общему числу альтернатив; $[W_1]$ – вектор приоритетов критериев относительно цели иерархии; $[B]$ – диагональная матрица, предназначенная для окончательного нормирования значений вектора приоритетов альтернатив после последовательного перемножения слева направо указанных матриц.

Расчет весовых коэффициентов критериев и вектор-столбца приоритетов альтернатив относительно главной цели производился в специализированном программном продукте: *Collaborative Decision Making Software*, фирмы MakeItRational. Результаты расчета представлены на рис. 2 и 3.

Таким образом, математическая модель интегрального показателя выбора эффективных мероприятий (ВЭМ) применительно к иерархической схеме (рис. 1) представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{ВЭМ} = & 0,0517x_1 + 0,0535x_2 + \\ & + 0,0379x_3 + 0,0509x_4 + 0,0649x_5 + \\ & + 0,0837x_6 + 0,0477x_7 + 0,0313x_8 + \\ & + 0,0309x_9 + 0,0693x_{10} + 0,0618x_{11} + \\ & + 0,0806x_{12} + 0,0683x_{13} + 0,0501x_{14} + \\ & + 0,0741x_{15} + 0,0487x_{16} + 0,0595x_{17} + \\ & + 0,035x_{18}, \end{aligned} \quad (4)$$

где x_1, x_2, \dots, x_{18} – объемы денежных средств, выделяемых рассматриваемым промышленным предприятием на реализацию мероприятия по энергосбережению в системе теплоснабжения.

При анализе данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что наиболее ак-

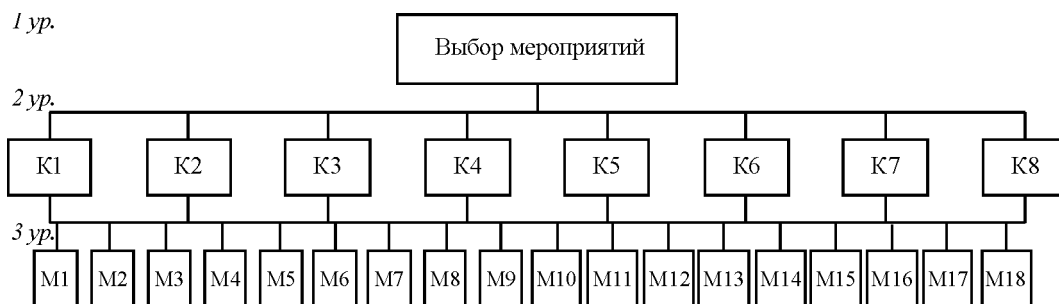


Рис. 1. Иерархическая схема многокритериального анализа мероприятий

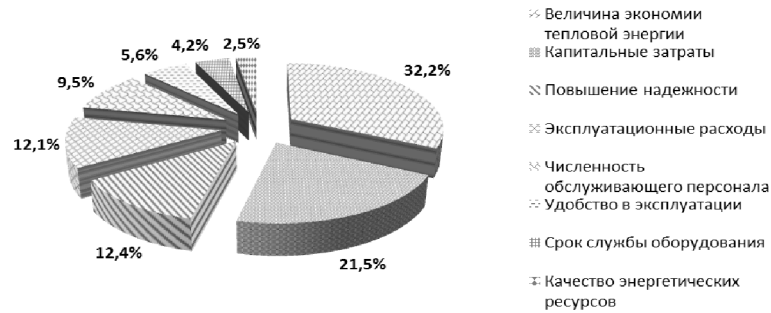


Рис. 2. Результат расчета весовых коэффициентов критериев иерархии

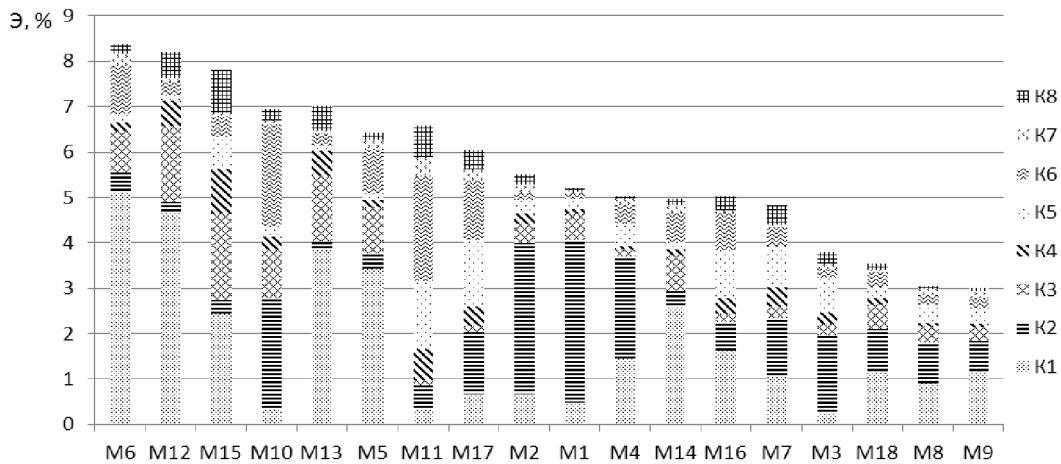


Рис. 3. Результат расчета по выбору наилучшей альтернативы относительно главной цели

туальными направлениями для объекта исследования являются мероприятия 6, 12 и 15. Основной эффект от внедрения данных мероприятий будет направлен на снижение тепловых потерь (K1), снижение эксплуатационных затрат (K3) и повышение надежности (K6).

Одной из основных моделей метода DEA является CCR модель [2, 4], которая и будет применяться для решения поставленной задачи.

В общем случае производственный объект (*Decision Making Unit*) рассматривается как объект, в котором осуществляется преобразование входных параметров в выходные, и чьи действия должны быть оценены. В нашем случае производственным объектом является мероприятие по энергосбережению и энергоэффективности системы теплоснабжения промышленного предприятия.

Интегральная эффективность объекта в методологии DEA с одним входом X и одним выходом Y оценивается как производительность входного ресурса:

$$k = \frac{Y}{X}. \quad (5)$$

В общем случае рассматриваемый производственный объект имеет m входных параметров требующих минимизации, и s выходных параметров требующих максимизации. Таким образом, $X_j = (x_{1j}, \dots, x_{mj}) \geq 0$ – вектор входных переменных (капитальные затраты, человеческие ресурсы), а $Y_j = (y_{1j}, \dots, y_{sj}) \geq 0, j = 1, \dots, n$ – вектор выходных переменных (снижение тепловых потерь, повышение надежности).

Для каждого производственного объекта мы формируем виртуальные входы (x_{mj}) и выходы (y_{sj}), которые характеризуются соответствующими весами v_{mj} и u_{sj} :

$$X_j = v_{1j}x_{1j} + \dots + v_{mj}x_{mj}, \quad (6)$$

$$Y_j = u_{1j}y_{1j} + \dots + u_{sj}y_{sj}. \quad (7)$$

В качестве базового состава частных критериев оценки мероприятий методом DEA используется совокупность характеристик, рассмотренных в МАИ. Для оценки мероприятий методом DEA по совокупности частных

критериев $x1, x2, x3, y1, y2, y3, y4, y5$ строится структурная модель (рис. 4) и решается задача математического программирования следующего вида [5]:

$$\max_{u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}, v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, v_{4j}, v_{5j}} h_j = \frac{u_{1j} \cdot y_{1j} + u_{2j} \cdot y_{2j} + u_{3j} \cdot y_{3j} + u_{4j} \cdot y_{4j} + u_{5j} \cdot y_{5j}}{v_{1j} \cdot x_{1j} + v_{2j} \cdot x_{2j} + v_{3j} \cdot x_{3j}},$$

при ограничениях:

$$\frac{u_{11} \cdot y_{11} + u_{21} \cdot y_{21} + u_{31} \cdot y_{31} + u_{41} \cdot y_{41} + u_{51} \cdot y_{51}}{v_{11} \cdot x_{11} + v_{21} \cdot x_{21} + v_{31} \cdot x_{31}} \leq 1,$$

$$\frac{u_{12} \cdot y_{12} + u_{22} \cdot y_{22} + u_{32} \cdot y_{32} + u_{42} \cdot y_{42} + u_{52} \cdot y_{52}}{v_{12} \cdot x_{12} + v_{22} \cdot x_{22} + v_{32} \cdot x_{32}} \leq 1, \quad (7)$$

.....

$$\frac{u_{118} \cdot y_{118} + u_{218} \cdot y_{218} + u_{318} \cdot y_{318} + u_{418} \cdot y_{418} + u_{518} \cdot y_{518}}{v_{118} \cdot x_{118} + v_{218} \cdot x_{218} + v_{318} \cdot x_{318}} \leq 1,$$

$$u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}, v_{1j}, v_{2j}, v_{3j}, v_{4j}, v_{5j} > 0.$$

Система соотношений (7) для $j \in \{1, 2, \dots, 18\}$ определяет 18 задач математического программирования. Решая каждую из j -задач для j -го объекта, получаем значение соответствующего показателя эффективности h_j , ранжированное на единичном интервале $[0, 1]$, и соответствующие ему весовые коэффициенты $u_j = \{u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{18j}\}$ и $v_j = \{v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{18j}\}$.

Для решения поставленной задачи использовалось специализированное программное обеспечение *Banxia Frontier Analyst*, фирмы Banxia Software, применяющееся для решения задач методом DEA.

В результате решения 18 оптимизационных задач нелинейного математического программирования получены значения системной энергетической эффективности, приведенные на рис. 5.

Из рис. 5, видно, что наибольшая сравнительная системная эффективность у мероприятий 1, 2, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 ($h = 1$). Глобальные критерии остальных мероприятий меньше единицы ($h < 1$) и лежат в различных интервалах.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате произведенных расчетов по многокритериальному выбору направлений снижения тепловых потерь на промпредприятии методами МАИ и DEA можно сделать следующие выводы:

1) Из 18 предложенных мероприятий по энергосбережению, составленных по результатам проведенного энергетического обследования, 13 оказались эффективными и в дальнейшем были рекомендованы руководству к внедрению на предприятии.

2) Перечни наиболее неэффективных мероприятий по энергосбережению полученные в результате расчета методами МАИ и DEA, совпадают между собой и включают следующие мероприятия: М3, М7, М8, М9, М18. Данные мероприятия по согласованию с руководством предприятия были исключены из инвестиционной программы развития системы теплоснабжения.

Дополнительно произведен анализ использования данных методов для решения поставленной задачи со стороны исполнителя (энергоаудиторская организация, служба главного энергетика промпредприятия) по потребительским показателям:

1) Стоимость применения рассматриваемых программных продуктов для энергоаудиторских и промышленных организаций является экономически доступным.

2) Трудозатраты при применении данных программных продуктов для одинакового количества рассматриваемых мероприятий по энергосбережению значительно отличаются.

Повышенные трудозатраты при использовании метода МАИ связаны с необходимостью применения попарного сравнения всех рассматриваемых мероприятий по всем выбранным критериям, что в данном случае приводит к заполнению 8 матриц размерностью 18x18. При применении метода DEA исполнителем осуществляется заполнение одной матрицы размерностью 18x8.

Таким образом, при внесении корректировок в исходные данные после осуществления оптимизации необходимых параметров, трудозатраты при применении метода МАИ, из-за необходимости выполнения повторного парного сравнения рассматриваемого мероприятия со всеми остальными по заданному критерию с дальнейшей проверкой на согласованность всех суждений, приводит к увеличению трудозатрат по сравнению с методом DEA.

В результате произведенных вычислений по многокритериальному оцениванию направлений снижения тепловых потерь, для повышения качества предлагаемых мероприятий заказчику и снижения трудозатрат, предлагается:



Рис. 4. Структурная модель оценки мероприятий по энергосбережению

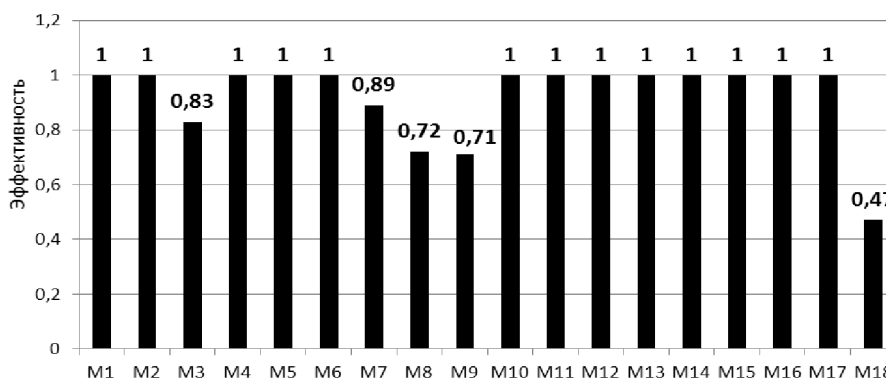


Рис. 5. Системная эффективность мероприятий по энергосбережению.

– при анализе не более 10 мероприятий по энергосбережению производить вычисления с помощью метода МАИ. Это позволит отсортировать рассматриваемые мероприятия по актуальности для заказчика.

– при рассмотрении мероприятий по энергосбережению в количестве более 10 шт., в зависимости от требований заказчика, предлагается:

– при экспресс анализе (например, для составления энергетического паспорта предприятия) производить многокритериальный анализ только с помощью метода ДЕА, для отбора эффективных мероприятий;

– при углубленном анализе (например, для составления инвестиционной программы промышленного предприятия) на первом этапе производить многокритериальный анализ с помощью метода ДЕА для выбора эффективных

мероприятий ($h = 1$). При необходимости, на основании полученных данных, осуществлять дополнительную оптимизацию неэффективных мероприятий ($h < 1$) по отдельным показателям, для возможности минимизации и/или максимизации рассматриваемых критериев и приведения их к эффективным.

После отбора эффективных мероприятий, выполнить расчет на основании метода МАИ для сортировки эффективных мероприятий по степени важности для заказчика, с учетом весовых коэффициентов частных критериев, согласованных с заказчиком.

Выполнение данного алгоритма при углубленном анализе позволяет исполнителю снизить свои трудозатраты, с помощью отсеивания неэффективных направлений на первом этапе, а также повысить качество предоставляемых

мероприятий по энергосбережению заказчику, с помощью ранжирования их по эффективности относительно главной цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Саати, Томас Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Томас Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

2. *Ramanathan. R.* An Introduction to data envelopment analysis: A tool for performance measurement / R. Ramanathan. – New Delhi: Sage Publications, 2003. – 203 p.

3. *Федоров Ю. В.* Принятие решений в управлении социально-экономическим развитием города / Ю. В. Федоров. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. –

Мокроусов В. С. – аспирант 3 года обучения кафедры информационных систем и информационного менеджмента, Владимирский государственный университет. Тел. (4922) 44-39-20. E-mail: valmok@mail.ru

184 с.

4. *Cooper William W.* Data Envelopment Analysis. Second Edition / William W. Cooper. – NY.: Springer Science, 2007. – 513 p.

5. *Кривоножко В. Е.* Анализ деятельности сложных социально-экономических систем / В. Е. Кривоножко. – М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова; МАКС Пресс, 2010. – 208 с.

Mokrousov V. S. – post-graduate student of information systems and information management department, Vladimir State University. Tel. (4922) 44-39-20. E-mail: valmok@mail.ru